

Durm¹, zu dem Schluß, daß diese Renaissancemeister wohl nicht »gerechnet« haben, daß sie sich auch »über gewisse Kräftewirkungen nicht immer im klaren waren«. Aber »ihr sicheres statisches Gefühl, gebildet an den Konstruktionen ihrer Vorfahren, die sie auf Herz und Nieren prüften, und die ihnen in Fleisch und Blut übergingen, hat sie nie im Stiche gelassen«. Freilich waren sie eher zu vorsichtig als zu kühn. Sie vervielfältigten die statisch wirksamen Mittel und erreichten den Schein leicht aufsteigender Wölbung mit einem großen Aufwand von Material. »Rationelle Konstruktionen« sind diese Steingewölbe der Renaissance nicht!

Eher noch sind es die *hölzernen Dachstühle* und die als Hänge- und Sprengwerke zusammengesetzten Baugerüste. An ihnen ließen sich die *Wirkungen der Zug- und Druckkräfte* unmittelbarer erproben und studieren.

Allein um solche Erwägungen vom Bau- und Zimmerplatz in die Studierstube des Gelehrten hinüberzutragen zu wissenschaftlich systematischer Durcharbeitung, dazu bedurfte es einer vollständigen Wandlung des ganzen geistigen Lebens. Was der Genius Lionardos einst in seiner verschwiegenen Riesenwerkstatt begonnen hatte, gewann in *Galilei* und *Newton* die werbende Kraft reformatorischer Gedanken und drang mit unaufhaltsamer Macht vorwärts. Und gerade die Gesetze der Körperwelt hatten dabei die ersten und höchsten Probleme geboten und die am gewaltigsten nachwirkenden Lösungen gefunden. Daran mußten auch die spezielleren »statischen« Grundlehren teilnehmen. Nun in der Tat beginnt seit dem Altertum die zweite Hauptperiode ihrer wissenschaftlichen Theorie². An ihrer Spitze steht das von *Galilei* selbst behandelte und nach ihm benannte statische »Problem« des Balkens, dessen eines Ende in eine Wand eingemauert ist und der durch sein eigenes oder ein hinzugefügtes Gewicht zum Bruch kommt: die erste »Theorie der Biegefestigkeit«³.

Galilei ward auch zum Förderer rationaler Konstruktion; er fand, daß Hohlkörper den Biegekräften wesentlich besser widerstehen als gleich schwere Vollkörper.

1. Statische Theorien.

Die Grundprinzipien der eigentlichen *Statik* als der Lehre vom Gleichgewicht sind in den Zeiten Galileis bereits vollständig erkannt. Ihre weitere wissenschaftliche Entwicklung geht derjenigen der *Dynamik*, als der ebenfalls mit Galilei beginnenden Lehre von der Bewegung der Körper, parallel.

Die Vervollkommnung der Elastizitätslehre, insbesondere der Theorie der Biegefestigkeit, durch *Hooke* und *Mariotte* bis zu den von *Euler* aufgestellten Gleichungen

¹ Vergl. Zwei Großkonstruktionen der italien. Renaissance. Zeitschr. f. Bauwes. XXXVII, 1887, Heft VII—IX und: Die Kuppel der Kirche Sa. Maria dell' Umiltà in Pistoja a. a. O., 1902.

² Die folgende geschichtliche Skizze stützt sich insbesondere auf G. Chr. Mehrrens, Vorlesungen über Statik der Baukonstruktionen und Festigkeitslehre. I. Bd. Leipzig 1903, S. 77 ff. — Vergl. G. Winkler, Abriß der Geschichte der Elastizitätslehre in Techn. Blätter. 1879. — Navier-Saint-Venant, L'application de la mécanique. III^e. édit. Paris 1864. S. XC ff. »Historique abrégée des recherches sur la résistance et sur l'élasticité des corps solides.« — Cantor, Geschichte der Mathematik.

³ Fortgesetzt für den auf beiden Enden unterstützten Balken durch Blondel (1661), Marchetti (1669), Fabri und Grandi (1660—1700), vergl. Mehrrens a. a. O., S. 77.

für die Knickfestigkeit förderte auch die Berechnung der Stabwerke. Im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts gibt *Coulomb* die richtige Lage der Gleichgewichtachse (der »neutralen Linie«), berechnet die in ihrer Bedeutung schon von *Lionardo* erkannten »Momente« der statischen Kräfte und berücksichtigt zum ersten Male die in der Querschnittsebene auftretenden »inneren Kräfte«, die Scherspannungen.

Hand in Hand mit diesen Entdeckungen selbst hatten sich auch die analytischen und synthetischen Methoden ihrer Darstellung vervollkommen. Zum numerischen Rechnen trat — besonders durch *Vieta* (1540—1603) — das Buchstabenrechnen mit abstrakten Größen, die Algebra; »der Ausdruck für die Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung, zwischen dem Ganzen und seinen Teilen wurde die »Gleichung«. Derselbe *Vieta* führte der Analysis die graphische Darstellung zu, die dann im »*Traité de Gnomonique*« des *de la Hire* 1682 zur systematischen Begleitung und Ergänzung der arithmetischen Operation und der algebraischen Formel wurde. Die Stabilitätsuntersuchungen ließen sich also nach Formeln in numerischen Tabellen und nach verhältnismäßig einfachen graphischen Darstellungen ausführen, und in der Tat folgten sich nun Tabellen und Hilfsbücher solcher Art sehr schnell. Am bekanntesten und verbreitetsten wurden die französischen Werke eines *de la Hire*, *Parent*, *Fresier*, dann eines *Bélibor* und *Bossut*.

Dennoch blieb bis zum Ende des 18. Jahrhunderts in den Kreisen der Architekten und der Bauingenieure noch immer die praktische Erfahrung die einzige als zuverlässig erkannte und verwandte Macht. Belege dafür bieten wie in der Renaissance die übrigens auch damals noch sehr vereinzelt *theoretischen Baulehren*, insbesondere für den Brückenbau. Sie verwenden bereits jene genau detaillierten Pläne und Tabellen für die Stärke der Hölzer, wie sie beispielsweise *de la Hire* in seinem »Traktat von Zimmerwerken« für verschiedene Trägerlängen aufgestellt hatte. *Leupold*, der seinem 1726 im Anschluß an den französischen Ingenieur *Gautier* veröffentlichten »*Theatrum pontificale*« oder »Schauplatz der Brücken und Brückenbauer« die *La Hiresche* Tabelle beifügt¹, rühmt: »Es ist nun soweit gekommen, daß man weiß, wie dick und lang die geschnittenen Hölzer sein müssen, eine gewisse Gewalt bei einer Brücke oder einem anderen Werk zu erhalten. Die Extrema soll man vermeiden, wozu die Praxis gute Vorteile lehret. So man die Dicke und Länge der Hölzer nach einer gewissen Einteilung machet, ist man vor das Einfallen sicher. Diese Einteilung oder dieser Entwurf soll deutlich zeigen, wieviel Holz nötig, ihre Maße, seine Natur, Unterschied und Eigenschaften und endlich ein jedes Stück zu seinem Gebrauche bemerken«. Alle diese Angaben sind noch Erfahrungswerte, ohne Erläuterung der Berechnungsmethoden, und wie weit man darin noch zurück war, lehrt beispielsweise die ebendort abgedruckte Bemerkung *Gautiers* über die Widerlager steinerner Brücken: »Die alten gaben den Pfeilern von den Brücken zu ihrer Dicke den dritten Teil von der Weite des Bogens, welche Dicke sie zuweilen bis auf die Hälfte der Weite vergrößerten; heutzutage hat man gefunden, daß diese Dicke zu groß und hat sie kleiner angenommen als $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ der Weite des Bogens. Weder die Alten noch die Neuen wissen *raison* darin zu geben, und so sie heutzutage gefordert würde, dürfte man in eben der Not stecken.«

¹ Vergl. Merckel, Zur Geschichte der Technik. Deutsche Bauztg. 1888, Nr. 46.

Um die Ausnützung dieser »raison« für die praktische Baukunst hatten sich die *Mathematiker* im 18. Jahrhundert selbst überhaupt nur wenig bemüht, und die Sprödigkeit der Architekten ihren Lehren gegenüber fand einen Hauptgrund in ihrer fast ausschließlich praktischen und formalen Schulung, von denen die letztere im wesentlichen auf die antik-klassischen Stile eingeschränkt blieb. Dieses Verhältnis betont schon 1789 der Mathematiker *Franz Gerstner*, wenn er in seiner als Doktor-dissertation der Prager Universität gedruckten kleinen »Einleitung in die statische Baukunst« sagt: »Bei den Fortschritten welche die mechanischen Künste seit einem Jahrhundert mit Hilfe der höheren Mathematik machten, traf die Baukunst das unverdiente Schicksal, ziemlich weit hinter den übrigen zurückzubleiben. Leibnitz und die Bernoulli hatten zwar auch einigen Samen zu ihrer Vervollkommnung gestreut, indem sie die Kettenlinie für die schicklichste zu Gewölben erklärten. Allein außerdem, daß sich diese Linie *mit dem guten Geschmack der Alten nicht vertragen wollte*, konnten oder wußten die Baumeister von derselben keinen vorteilhaften Gebrauch zu machen, weil sie mehr die Schwerpunkte der Gewölbesteine als die Lehrbögen anzugehen schien.« Auch die seitens der Mathematiker — wie 1793 von *Helpfenrieder*, Professor der Mathematik und Doktor der Theologie (!) an der Universität in Ingolstadt, mit seinen »Beiträgen zur bürgerlichen Baukunst« — in mehr populärer Form unternommenen Annäherungsversuche zwischen Mathematik und Praxis blieben erfolglos. Sie wurden von den Baupraktikern zuerst sogar mit größter Heftigkeit zurückgewiesen.

Der klassische Boden für diesen heute schon vergessenen und doch recht denkwürdigen Kampf ist wiederum Paris, und zwar unmittelbar vor und nach der Revolution. Der beredteste Gegner der Theoretiker war damals der tüchtige, aber bis zur Beschränktheit einseitige Architekt *Charles François Viel*, Baumeister der Pariser Hospitäler, Mitglied des »conseil des travaux publics« etc. Er veröffentlichte schon 1797 in seinem Hauptwerk: »Principes de l'ordonnance et de la construction des bâtiments«, neben den heftigsten Angriffen auf Soufflots teilweise von Mathematikern berechnete Konstruktionen an St. Geneviève (dem jetzigen Pantheon) und auf die Seinebrücke Peronnets, ein »Des dangers et de l'abus de la science du trait« überschriebenes Kapitel¹. Aber dort beschränken sich seine Einwände im wesentlichen noch auf *ästhetische* Bedenken gegen Konstruktionen die dem »emploi des masses« widersprächen. Später, nachdem insbesondere der Gewölbeeinsturz des Pantheons 1804 die Zuverlässigkeit der Berechnungen auch vor der öffentlichen Meinung erschüttert hatte, schrieb Viel sein voluminöses Buch: »De l'impuissance des mathématiques pour assurer la solidité des bâtiments. 1805« und ging in einer ganzen Reihe von Gelegenheitsbroschüren zu einer immer heftigeren Tonart über, die sich während des Baues der Madeleinekirche in heute besonders ergötzlichen Tiraden äußerte: »En architecture, pour la solidité des édifices, les calculs compliqués, hérissés de chiffres et de quantités algébriques, avec leurs ,puissances', leurs ,radicaux', leurs ,exposans', leurs ,coefficients' ne sont nullement nécessaires.« »Il faut se défendre d'autant plus aujourd'hui de l'influence funeste des machinistes des savans en x , y , z (!) pour les constructions.«

Das ließ Viel 1818 drucken, sieben Jahre nach der Vollendung des ersten, großen, lediglich durch statische Berechnung ermöglichten Eisenhochbaues! Es war die

¹ A. a. O., S. 199 ff. (Kap. XXXIV).

1809—1811 ausgeführte Kuppel der *Halle au blé* in Paris. Das einst von Philibert de l'Orme entworfene, 1783 von Roubo erneuerte Bohlendach dieser Halle war bereits 1802 durch Brand zerstört worden, und die Frage, wie es feuersicher zu ersetzen sei, stand jahrelang im Vordergrund aller beteiligten Interessen. Sie schürte den Gegensatz der alten und der neuen Schule zu hellen Flammen an. Projekt folgte auf Projekt. Auch Viel¹ beteiligte sich daran mit dem Entwurf eines mächtigen Steingewölbes. Zuletzt aber drang 1809 der kühne Entwurf des Architekten *Bellanger* durch, die 40 m Spannweite erfordernde Kuppel aus gußeisernen Rippen zu errichten und mit Kupferplatten einzudecken, und für diesen Entwurf lieferte der Ingenieur *Brunet*² nur auf *rechnerischem Wege* die *genaue* Detaillierung, die Bestimmung der Gesamtkonstruktion und die Angabe aller Maße³. Das ist nicht nur in der Geschichte des Eisenbaues ungemein wichtig — große eiserne Brücken waren schon zuvor errichtet worden —, es ist vor allem der Anfang jener Machtstellung, den das *statische Rechnen* im heutigen Eisenbau einnimmt. Der Tragweite des ganzen Ereignisses war man sich in Paris übrigens wohl bewußt, und der Einweihung des Baues 1811 wohnte sogar der Kaiser Napoleon bei. Aber der persönliche Streit zwischen den »Statikern« und »Praktikern« bestand fort. Er war nur die Sonderform jenes seit dem Ende des 18. Jahrhunderts ausgebildeten Gegensatzes der »constructeurs« und »ingénieurs« zu den »architectes«. Über das rechte Ziel schossen beide hinaus. Jene behaupteten, in der Architektur »beruhe *alles* auf Geometrie«, die ganze Baukunst sei eine »Tochter der mathematischen Wissenschaften«, deren »naturalisation scientifique« (!) unerlässlich werde — die »architectes« dagegen leugneten die Zuverlässigkeit der Theorien, stellten — wie Viel — ganze Listen der Bauten auf, die »trotz der Berechnung eingestürzt seien«, und wiesen auf die bei jedem Kunstwerk entscheidende Macht des »persönlichen Genies«⁴.

Inmitten dieser Streitrufe aber arbeitete einer der besten Baupraktiker und zugleich ein zum Lehren ungewöhnlich begabter Theoretiker, Soufflots größter Schüler *Rondelet*, an seinem noch heute berühmten und brauchbaren »*Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*« (Paris 1812—1817), wo die statische Berechnung zum ersten Male als ein wesentlicher Teil der Konstruktionslehre behandelt ist⁵, und gleichzeitig wurden die gesamten statischen und dynamischen Theorien seitens der mathematischen Wissenschaft selbst nicht nur von neuem geprüft und verbessert, sondern ebenfalls zu einem großen Lehrgebäude verbunden. Auch dies geschah durch einen Franzosen: durch den als Gelehrter und Praktiker gleich bedeutenden Ingenieur *Louis Navier* (1785—1836). Sein Hauptwerk »*L'application de la mécanique*«

¹ Viel, Dissertation sur la Halle au blé à Paris.

² Brunet, Dimensions des fers qui doivent former la coupole de la Halle au blé. 1809.

³ Vergl. Benoit a. a. O., S. 22 ff.

⁴ Vergl. Benoit a. a. O., S. 24. Dieses Mißtrauen währte in den Pariser Kreisen bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts. Besondere Nahrung erhielt es durch den Einsturz der zum Teil aus Schmiedeeisen konstruierten großen basilikalen Markthallen von Paris 1842. Vergl. Försters Bauzeitung 1838, S. 30, Bl. 185; 1840, S. 280; 1844, S. 165.

⁵ Rondelets Werk wurde 1823 ins Deutsche übertragen, in Deutschland selbst aber hatte bereits David Gilly seit 1797 mit seinem »Handbuch der Landbaukunst« (3. Bde., Berlin-Halle; der 3. Bd. 1811 von Friederici) erfolgreich einen ähnlichen Weg beschritten.

à l'établissement des constructions et des machines«¹ (1. Ausg. 1826, Paris) ist ein Markstein in der Geschichte aller hier in betracht stehenden Fragen. Sein Hauptzweck war, der »herrschenden Praxis« eine wissenschaftliche Lehre an die Seite zu stellen. In der Vorrede heißt es noch 1826: »La plupart des constructeurs déterminent les dimensions des parties des édifices ou des machines d'après les usages établis et l'exemple des ouvrages existants; ils se rendent compte rarement des efforts que ces parties supportent et des résistances qu'elles opposent . . . L'objet de ces 'Résumés'« — unter diesem Titel erschien das Naviersche Werk zunächst als Leitfaden seiner Vorlesungen an der École des ponts et chaussées — »est d'exposer les conditions de l'établissement des constructions que les ingénieurs dirigent, et de mettre à même de vérifier le degré de résistance de chacune de leurs parties.«

In Naviers Werk ist der Theorie der hölzernen und eisernen Stabwerke der letzte Abschnitt gewidmet, er behandelt aber fast ausschließlich die Sprengwerke. Die Berechnung und Theorie des *gegliederten Trägers*, des im heutigen Eisenbau wichtigsten Faktors, hat die schon durch den Herausgeber Naviers *Saint Venant* beschleunigten Fortschritte der Elastizitätslehre während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur Voraussetzung, gehört aber als selbständige, den in ihnen gegebenen statischen Bedingungen entsprechende Methode erst der zweiten Hälfte an. Bahnbrechend waren dafür die Arbeiten der Theoretiker, des Deutschen *Culmann* und des Italieners *Cremona* 1851. Das erste allgemeine einfache und praktische Verfahren der Berechnung von durchgehenden Trägern stammt aus dem Jahre 1857 von dem Ingenieur *Clapeyron*, der es damals »beim Bau großer Eisenbrücken verwandte«. (Mehrtens).

2. Graphische Darstellungsmethoden.

Bald darauf gesellte sich diesen Theorien und Berechnungsmethoden ein bedeutender, auch auf ihre Erweiterung zurückwirkender Fortschritt ihrer *Darstellungsmethoden*. Das geschah durch den Bund der analytischen Untersuchung mit der synthetischen, die im wesentlichen von geometrischen Anschauungen ausgeht.

Auch dafür war der Boden schon im 16. und 17. Jahrhundert bereitet worden², vor allem durch *Simon Stevinus* (1548—1603), der zuerst die Größe der Kräfte als Längen ihr parallel laufender gerader Linien darstellte. Erst von da an ward das Dreieck auch als statisch wichtigste Figur des Baues wissenschaftlich erkannt. Stevinus selbst fand 1576 auf graphischem Wege: »daß drei auf einen Punkt wirkende Kräfte sich das Gleichgewicht halten, wenn sie parallel und proportional den drei Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks sind«³.

1687 veröffentlichte dann *Newton* den Satz vom »Parallelogramm der Kräfte« und gleichzeitig *Varignon* das »Kräftepolygon« und das »Seilpolygon«: die Fundamente der »graphischen Statik«. Allein in der mit Leibnitz' Infinitesimalrechnung

¹ Zuerst 1824 nur für seine Hörer, dann 1826 unbeschränkt veröffentlicht; viele neue Bearbeitungen und Übersetzungen. (III. Ed. von Barbé de Saint-Venant. Paris 1864; dort S. XXXIX ff. Biographie und Bibliographie Naviers). Die »Résistance des corps solides« ist im ersten Band behandelt.

² Zum Folgenden vergl. besonders J. J. Wehrauch, Über die graphische Statik. Leipzig 1874.

³ De Beghinselen der Weegkonst s. Statica. 1586.